饲粮铜水平对奶牛生产性能、养分表观消化率及血清生化指标的影响

付辑光[1]　高艳霞[1]　李　妍[2]　李秋凤[1]　曹玉凤[1]　张秀江[3]　李建国[1*]

（1.河北农业大学动物科技学院，保定 071001；2.河北农业大学动物医学院，保定 071001；3.保定市农业局，保定 071000）

摘　要：本试验旨在研究饲粮铜水平对奶牛生产性能、养分表观消化率及血清生化指标的影响。选取 60 头产奶量、泌乳天数及胎次相近的中国荷斯坦奶牛，按随机分配原则分为 4 组，各组饲粮中铜添加量分别为 0（对照，I组）、10（II组）、15（III组）和 20 mg/kg（IV组），饲粮铜水平分别为 8.09、18.09、23.09 和 28.09 mg/kg DM，每组 15 头，试验期共 93 d。结果表明：1）与I组相比，II、III与IV组的产奶量分别提高了 4.91%、6.27%及 4.78%（P<0.05），乳中体细胞数量极显著降低（P<0.01）。2）与I组相比，II和III组的中性洗涤纤维（NDF）表观消化率分别提高了 6.21%和 7.60%（P<0.05），酸性洗涤纤维（ADF）表观消化率分别提高了 6.78%和 8.22%（P<0.05）。3）与I组相比，II、III和IV组血清铜、铜蓝蛋白含量及超氧化物歧化酶（SOD）、铜-锌超氧化物歧化酶（Cu-Zn SOD）和谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性极显著提高（P<0.01），丙二醛（MDA）含量分别降低了 50.00%、60.23%和 47.08%（P<0.01），免疫球蛋白 G（IgG）含量分别提高了 49.56%、165.56%和 90.22%（P<0.01）。4）铜代谢指标分析说明，与I组相比，饲粮中补充铜能极显著提高粪铜、尿铜含量（即粪和尿中铜的排出量）和铜沉积量（P<0.01），但饲粮铜水平对铜表观消化率没有显著影响（P>0.05）。在本试验条件下，饲粮中补充铜可提高奶牛的生产性能，促进机体对养分的利用，提高机体免疫力和抗氧化能力，但粪铜随着饲粮铜水平的增加而增加。综合考虑，在本试验条件下，奶牛饲粮适宜铜水平为 18.09～23.09 mg/kg DM（铜采食量为 403.59～514.21 mg/d）。

关键词：奶牛；铜；生产性能；表观消化率；血清生化指标；铜代谢

中图分类号：S823　　文献标识码：A　　文章编号：

收稿日期：2018-02-07

基金项目：国家现代农业（奶牛）产业技术体系建设专项资金（CARS-36）；河北省科技计划项目（16226604D，179676296H）；河北省奶牛创新团队

作者简介：付辑光（1991—），男，河北石家庄人，硕士研究生，研究方向为动物营养与饲料科学。E-mail： 278070263@qq.com

*通信作者：李建国，教授，博士生导师，E-mail： 1181935094@qq.com

微量元素铜对奶牛泌乳与健康有重要作用，随着奶牛生产水平的不断提高，生产者为防止奶牛因缺铜而导致繁殖性能、生产性能和免疫功能的下降，往往在饲粮中超量添加铜[1-2]。早在 20 世纪初，科学家就证实铜是机体所必需的微量元素之一，它不仅参与酶的合成，还是一些酶的重要组成部分与一些酶的特殊激活剂[3-4]。于先宁等[5]研究表明，饲粮中添加 10 mg/kg 铜能提高奶牛的乳脂率和产奶量；刘曦[6]报道，当奶牛饲粮中添加 16 mg/kg 铜时，产奶量比对照组提高了 20.79%，当饲粮中添加 24 mg/kg 铜时，产奶量降低；饲粮中添加适量的铜能提高血清铜蓝蛋白含量和超氧化物歧化酶（SOD）的活性[6-7]，当饲粮中添加 24 或 27 mg/kg 铜时，血清铜蓝蛋白含量和 SOD 活性降低[6-8]；Underwood 等[9]提出饲粮中添加硫和钼会降低铜的利用率；对于 1 头体重 650 kg、产奶 40 kg 的奶牛，饲粮中铜的需要量已由 10 mg/kg（NRC，1988）[10]提高到 15.7 mg/kg（NRC，2001）[11]。另据报道，奶牛对铜的需要量应在 NRC（2001）基础上再提高 20%~50%[12]。综上所述，前人对奶牛铜需要量及不同铜添加水平对奶牛的影响进行了研究，但试验结果不尽一致，对血清中铜蓝蛋白含量和 SOD 活性等指标研究较多，而对其他血液指标报道较少，不能全面揭示铜对奶牛生理状态的影响。另外，奶牛品种改良及生产水平提高等因素也会影响奶牛对铜的需要量。本试验旨在通过研究不同饲粮铜水平对奶牛生产性能、养分表观消化率和血清生化指标的影响，为奶牛饲粮中适宜铜水平提出建议值。

1　材料与方法

1.1　试验设计与试验动物

试验在保定昊宇牧业公司奶牛场进行。选择 60 头健康无疾病且处于泌乳中期的荷斯坦奶牛，采用单因子随机试验设计，随机分为 4 组，每组 15 头牛，各组间平均胎次、产奶量和泌乳天数差异均不显著（P>0.05）。以饲料级五水硫酸铜为铜源，各试验组在基础饲粮基础上分别添加 0（对照，Ⅰ组）、10（Ⅱ组）、15（Ⅲ组）和 20 mg/kg 铜（Ⅳ组），饲粮铜水平分别为 8.09、18.09、23.09 及 28.09 mg/kg DM。试验期 93 d，包括 90 d 饲养试验和 3 d 消化代谢试验。基础饲粮组成及营养水平见表 1.

表 1　基础饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis)　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
苜蓿干草 Alfalfa hay	15.35

全株玉米青贮 Whole corn silage	25.37
羊草 *Leymus chinensis*	5.00
玉米 Corn	12.71
蒸汽压片玉米 Steam flaked corn	5.62
全棉籽 Whole cottonseed	4.60
甜菜颗粒 Beet pellet	3.70
大豆皮 Soybean hulls	1.93
豆粕 Soybean meal	11.33
棉籽粕 Cottonseed meal	1.92
玉米干酒糟及其可溶物 Corn DDGS	1.92
膨化大豆 Extruded soybean	1.55
菜籽粕 Rapeseed meal	1.15
啤酒糟 Brewers dried grain	3.91
预混料 Premix[1)]	1.00
小苏打 $NaHCO_3$	1.06
氧化镁 MgO	0.26
石粉 Limestone	0.64
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.77
食盐 NaCl	0.21
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
产奶净能 NE_L/（MJ/kg）	6.46
粗蛋白质 CP	16.52
粗脂肪 EE	4.48
中性洗涤纤维 NDF	34.77
酸性洗涤纤维 ADF	21.87
钙 Ca	0.80
磷 P	0.63
硫 S	0.29
钼 Mo/(mg/kg)	1.96
铜 Cu/(mg/kg)	8.09

[1)]预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of the diet：VA 3 169 IU，VD_3 864 IU，VE 23 IU，Fe (as ferrous sulfate) 15 mg，I (as potassium iodide) 0.5 mg，Se (as sodium selenite) 0.3 mg，Zn (as zinc sulfate) 48 mg，Mn (as manganese sulfate) 14 mg，Co (as cobalt chloride) 0.11 mg，Cu (as copper sulfate) 0。

[2)]产奶净能(NE_L)为计算值，为各原料的 NE_L[11]分别乘以各自在全混合日粮（TMR）中所占的比例，再相加求和；其余营养水平为实测值。Net energy for lactation (NE_L) was a calculated value，which was the sum of NE_L[11] of ingredients multiplied by their percentages in the total mixed ration (TMR)； while the other nutrient levels were measured values.

1.2 试验饲粮和饲养管理

试验牛采用散栏饲养，自由采食，自由饮水，每日上料 2 次，试验组将含有不同铜水平的预混料和精料混匀后再和粗饲料进行搅拌，混匀后分别饲喂。试验期间每天记录产奶量。

试验用预混料定制于北京福维康生物科技有限公司。

1.3 试验数据和样品采集

1.3.1 饲料样品的采集

试验期间，每周连续 3 d 称取各试验组饲粮的供应量和剩余量。同时按照四分法，采集饲料样品，并制成风干样品（65 ℃下烘干 48 h 至恒重），置于塑料封口袋内保存。

1.3.2 产奶量及乳样的采集

试验期间，每天记录日产奶量，每月采集 1 次奶样，早、中、晚各收集乳样 60 mL，将 1 d 中的乳样按 4:3:3 比例混合均匀，用于乳成分的测定。

1.3.3 血样的采集

饲养试验结束前 1 天，于晨饲前颈静脉无菌采血，每组采集 3 头牛，37 ℃水浴 0.5 h 后离心（1 240×*g*，15 min），分离血清。用尖嘴吸管吸取上层血清，分装于带盖的 0.5 mL 离心管中，做好标记，-20 ℃冻存，用于血清生化指标的测定。

1.3.4 粪样及尿样的采集

饲养试验结束当天，每组随机选择 3 头试验牛，继续饲喂试验饲粮，采用全收粪和收尿法进行消化代谢试验，连续收集 3 d。收集粪便后称重，将每头牛每天的粪样混合均匀后取粪样的 5%分成 2 份，1 份加 10%的稀硫酸（每 100 g 粪样加 20 mL 10%的稀硫酸），1 份不加酸；尿样收集前在集尿桶中加入 200 mL 10%的稀硫酸防止尿样腐败分解，准确计量后取总尿量的 1%，将每天的尿样混合均匀。粪样和尿样于-20 ℃保存以待分析。

1.4 指标的测定方法

1.4.1 采食量的测定

试验期内每周选择连续 3 d 记录投料量（全混合日粮车停稳状态下电子显示的投料量），每次饲喂前收集剩料并称重，根据投料量和剩料量计算每组奶牛的总采食量，共测定 39 次，由每组每天总采食量除以每组牛头数计算得出每组每头奶牛的平均日采食量。利用 39 次的测定值，计算出各组整个试验期每头奶牛的平均日采食量。

1.4.2 饲粮样品、粪样和尿样中养分含量的测定

将饲粮与粪样放入 65 ℃鼓风烘箱中烘 48 h，然后冷却 24 h 至常温后称重，测得初水分含量。将 2 g 风干饲粮与粪样放入 105 ℃鼓风烘箱中烘 3 h，取出，在干燥器中冷却 30 min，

再同样烘干 1 h，冷却，称重，直到 2 次重量差小于 0.000 2 g，测得吸附水含量。从而计算得到饲粮与粪样的干物质含量。每日干物质采食量=平均每日采食量×干物质含量。

饲粮和粪样中粗脂肪（EE）、钙（Ca）和磷（P）含量的测定按照对应国家标准[13-15]的测定方法进行，中性洗涤纤维（NDF）和酸性洗涤纤维（ADF）含量按照对应国家标准[16-17]的测定方法使用全自动纤维仪 ANKOM-A2000i（美国）测定。饲粮、粪样和尿样中的含氮量按照国家标准[18]的测定方法使用全自动凯氏定氮仪（FOSS-8400，丹麦）测定。饲粮中硫和钼含量按照对应国家标准[19-20]的测定方法使用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，美国）测定。

饲粮养分的表观消化率计算公式如下：

$$某养分表观消化率（\%）=100×（A_1-B_1）/A_1。$$

式中：A_1 为饲粮中某养分含量；B_1 为粪中某养分含量。

1.4.3 乳成分的测定

用乳成分分析仪（MilkoScan^{TM} Mars，丹麦）检测乳脂率、乳蛋白率、乳糖率、乳非脂固形物（SNF）含量、乳总固形物含量和乳体细胞数量。

1.4.4 血清生化指标的测定

血清葡萄糖(Glu)含量采用葡萄糖氧化酶法，总蛋白(TP)含量采用双缩脲法，铜含量采用络合比色法，甘油三酯(TG)含量采用甘油三酯检测试剂盒（GPO-PAP）法，用半自动生化分析仪（Microlab300，荷兰）测定，操作过程按照中生北控生物科技股份有限公司试剂盒说明书进行。

血清中铜蓝蛋白、丙二醛(MDA)、三碘甲状腺原氨酸(T_3)、甲状腺素(T_4)和免疫球蛋白G(IgG)含量，超氧化物歧化酶(SOD)、铜-锌超氧化物歧化酶(Cu-Zn SOD)及谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性及总抗氧化力(T-AOC)均采用酶联免疫分析试验（ELISA）中的双抗体夹心法，用酶标仪（Power Wave XS2，美国）测定，操作过程按照中生北控生物科技股份有限公司试剂盒说明书进行。

1.4.5 饲粮、粪样、尿样和乳中铜含量的测定

饲粮、粪样、尿样和乳中铜含量的测定参照国家标准[21]的测定方法，采用火焰原子吸收光谱仪（Zeenit-700P，德国）测定。

1.5　统计分析

试验数据采用 SPSS 19.0 统计软件中 ANOVA 过程进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，差异显著时用 Duncan 氏法进行组间多重比较。试验结果用平均值±标准差表示，以 P<0.05 为差异显著，以 P<0.01 为差异极显著。

2　结　果

2. 1　饲粮铜水平对奶牛干物质采食量和生产性能的影响

由表 2 可知，不同试验组的干物质采食量差异不显著（P>0.05）。试验牛的产奶量随着饲粮铜水平的增加呈上升趋势，III组的产奶量最高，而铜水平最高的IV组产奶量略有下降。II、III和IV组产奶量分别比I组提高了 4.91%、6.27%和 4.78%（P<0.05），但II、III和IV组之间产奶量差异不显著（P>0.05）。

随着饲粮铜水平的增加，乳脂率和乳蛋白率呈先增高后降低的趋势，III组乳脂率和乳蛋白率分别比I组提高了 5.31%和 5.26%，但各组之间差异不显著（P>0.05）。饲粮铜水平对乳糖率、乳 SNF 含量和乳总固形物含量无显著影响（P>0.05）。

乳体细胞数量随着饲粮铜水平的增加而降低，II、III和IV组的乳体细胞数量分别比I组降低了 11.34%、15.18%和 17.42%（P<0.01），但II、III和IV组之间差异不显著（P>0.05）。随着饲粮铜水平的增加，饲料转化率（FCR）呈上升趋势，II、III和IV组的 FCR 分别比I组提高了 4.26%、5.67%和 4.26%，但各组间差异不显著（P>0.05）。

表 2　饲粮铜水平对奶牛干物质采食量和生产性能的影响

Table 2　Effects of dietary copper levels on DMI and performance of lactating dairy cows[2)]

项目 Items	组别 Groups I	II	III	Ⅳ	P 值 P-value
干物质采食量 DMI/(kg/d)	22.23±0.70	22.31±0.34	22.27±0.47	22.23±0.28	0.879
产奶量 Milk yield/(kg/d)	32.40±1.84^{a}	33.99±1.81^{b}	34.43±2.04^{b}	33.95±1.88^{b}	0.035
4%标准乳 4% FCM/(kg/d)	31.28±1.77^{a}	32.82±1.74^{b}	33.24±1.97^{b}	32.78±1.81^{b}	0.035
乳脂率 Milk fat percentage/%	3.77±0.55	3.88±0.55	3.97±0.37	3.83±0.44	0.697
乳蛋白率 Milk protein percentage/%	3.04±0.21	3.16±0.28	3.20±0.25	3.11±0.25	0.349
乳糖率 Lactose percentage/%	4.60±0.20	4.58±0.21	4.46±0.22	4.44±0.21	0.082
乳非脂固形物 Milk SNF/%	8.47±0.29	8.43±0.41	8.22±0.32	8.21±0.32	0.073
乳总固形物 Total milk solid/%	12.00±0.60	12.01±0.80	11.83±0.75	11.55±0.73	0.270
乳体细胞数量 Somatic cell count in milk/($\times 10^4$ mL^{-1})	16.93±1.14^{Bb}	15.01±1.28^{Aa}	14.36±1.01^{Aa}	13.98±1.12^{Aa}	<0.001
饲料转化率 FCR[1)]	1.41	1.47	1.49	1.47	

[1)] FCR=4%标准乳产量（kg）/干物质采食量（kg）。FCR=4% FCM (kg)/DMI (kg).

[2)] 同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著(P>0.05)，不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，不

同大写字母表示差异极显著(*P*<0.01)。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (*P*>0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05), and with different capital letter superscripts mean significant difference (*P*<0.01). The same as below.

2.2 饲粮铜水平对奶牛养分表观消化率的影响

由表 3 可知，试验各组间的 CP、EE、Ca 和 P 表观消化率差异不显著（*P*>0.05）。II和III组的 NDF 的表观消化率分别比I组提高了 6.21%和 7.60%（*P*<0.05）；II 和III组的 ADF 的表观消化率分别比I组提高了 6.78%和 8.22%（*P*<0.05）；I和IV组的 NDF 和 ADF 表观消化率差异不显著（*P*>0.05）。

表 3 饲粮铜水平对奶牛养分表观消化率的影响

Table 3 Effects of dietary copper levels on nutrients apparent digestibility of lactating dairy cows %

项目 Items	组别 Groups I	II	III	IV	*P* 值 *P*-value
粗蛋白质 CP	78.93±2.31	81.22±2.05	83.04±0.66	79.23±0.80	0.138
粗脂肪 EE	84.55±2.03	86.54±1.90	87.47±2.48	85.35±1.82	0.383
中性洗涤纤维 NDF	56.97±1.87^{a}	60.51±1.59^{b}	61.30±1.72^{b}	57.87±1.80^{ab}	0.046
酸性洗涤纤维 ADF	51.44±1.76^{a}	54.93±1.68^{b}	55.67±1.06^{b}	52.48±1.90^{ab}	0.040
钙 Ca	41.30±2.36	43.70±2.31	42.93±2.61	42.22±2.88	0.702
磷 P	51.75±2.09	54.16±2.16	54.62±2.31	52.26±1.55	0.310

2.3 饲粮铜水平对奶牛血清抗氧化指标的影响

由表 4 可知，随着饲粮铜水平的增加血清铜含量呈增高的趋势。与I组相比，II、III和IV组血清铜含量分别提高了 26.85%、24.92%和 41.03%（*P*<0.01）；IV组血清铜含量极显著高于其他各组（*P*<0.01），但II和III组之间差异不显著（*P*>0.05）。随着饲粮铜水平的增加，血清铜蓝蛋白含量及 SOD、Cu-Zn SOD 和 GSH-Px 活性逐渐增加。与I组相比，II、III和IV组血清铜蓝蛋白含量分别提高了 9.93%、20.71%和 40.24%（*P*<0.01）。II、III和IV组的血清 SOD、Cu-Zn SOD 和 GSH-Px 活性也均极显著高于I组（*P*<0.01）。血清 T-AOC 随着饲粮铜水平的增加呈先增高后降低的趋势，II、III和IV组血清 T-AOC 极显著或显著高于I组（*P*<0.01 或 *P*<0.05）。与I组相比，II、III和IV组血清 MDA 含量分别降低了 50.00%、60.23%和 47.08%（*P*<0.01）。

表 4 饲粮铜水平对奶牛血清抗氧化指标的影响

Table 4 Effects of dietary copper levels on serum antioxidant indices of lactating dairy cows

项目 Items	组别 Groups I	II	III	IV	*P* 值 *P*-value
铜 Copper/(μmol/L)	9.87 ± 0.60^{Aa}	12.52 ± 0.29^{Bb}	12.33 ± 0.19^{Bb}	13.92 ± 0.53^{Cc}	<0.001
铜蓝蛋白 Ceruloplasmin /(pg/mL)	473.26 ± 25.34^{A}	520.26 ± 26.30^{B}	571.29 ± 26.32^{C}	663.68 ± 28.12^{D}	<0.001
超氧化物歧化酶 SOD/(ng/mL)	235.33 ± 20.36^{Aa}	272.77 ± 20.21^{Bb}	293.05 ± 13.83^{Bc}	320.99 ± 19.08^{Cd}	<0.001
铜锌超氧化物歧化酶 Cu-Zn SOD/(ng/mL)	161.18 ± 13.37^{A}	178.79 ± 10.00^{B}	213.16 ± 9.66^{C}	230.69 ± 12.39^{D}	<0.001
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(pg/mL)	50.70 ± 4.85^{Aa}	66.53 ± 5.25^{Bb}	73.01 ± 5.68^{BCc}	77.91 ± 5.53^{Cc}	<0.001
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	4.16 ± 0.48^{Aa}	5.13 ± 0.39^{Bc}	5.21 ± 0.24^{Bc}	4.58 ± 0.40^{Ab}	<0.001
丙二醛 MDA/(mmol/L)	3.42 ± 0.12^{Cc}	1.71 ± 0.20^{ABb}	1.36 ± 0.07^{Aa}	1.81 ± 0.13^{Bb}	<0.001

2.4 饲粮铜水平对奶牛血清生化指标的影响

由表 5 可知，随着饲粮铜水平的增加，血清 TP 含量逐渐增加，与I组相比，II、III和IV组 TP 含量分别提高了 2.48%（*P*>0.05）、6.45%（*P*<0.01）和 11.46%（*P*<0.01）；血清 Glu 含量随着饲粮铜水平的增加呈现出先增加后降低的趋势，II、III和IV组 Glu 含量分别比I组提高了 10.25%（*P*>0.05）、25.09%（*P*<0.01）和 15.55%（*P*<0.05）；血清 TG 含量各组之间差异不显著（*P*>0.05）。随着饲粮铜水平的增加，血清 T_3 和 T_4 含量逐渐增加，与I组相比，II、III和IV组血清 T_3 含量分别提高了 15.02%、19.48%和 36.29%（*P*<0.01），血清 T_4 含量分别提高了 15.03%、17.31%和 33.98%（*P*<0.01）。血清 IgG 含量随着饲粮铜水平的增加呈先升高后降低的趋势，与I组相比，II、III和IV组血清 IgG 含量分别提高了 49.56%、165.56%和 90.22%（*P*<0.01），III组极显著高于其他各组（*P*<0.01），II和IV组之间差异不显著（*P*>0.05）。

表 5 饲粮铜水平对奶牛血清生化指标的影响

Table 5 Effects of dietary copper levels on serum biochemical indices of lactating dairy cows

项目 Items	组别 Groups I	II	III	IV	*P* 值 *P*-value
总蛋白 TP/(g/L)	85.25 ± 1.19^{Aa}	87.36 ± 2.08^{ABa}	90.75 ± 1.08^{Bb}	95.02 ± 1.50^{Cc}	<0.001
葡萄糖 Glu/(mmol/L)	2.83 ± 0.22^{Aa}	3.12 ± 0.23^{ABab}	3.54 ± 0.22^{Bb}	3.27 ± 0.21^{ABb}	0.023
甘油三酯 TG/(mmol/L)	0.14±0.01	0.16±0.05	0.17±0.05	0.18±0.05	0.684
三碘甲状腺原氨酸 T_3/(ng/mL)	64.46 ± 7.50^{Aa}	74.14 ± 7.11^{Bb}	77.02 ± 6.87^{Bb}	87.85 ± 6.68^{Cc}	<0.001
甲状腺素 T_4/(μg/L)	154.58 ± 7.56^{Aa}	177.81 ± 8.41^{Bb}	181.34 ± 7.51^{Bb}	207.11 ± 8.21^{Cc}	<0.001

免疫球球蛋白 G IgG/(μg/mL)	4.50±0.64^{Aa}	6.73±0.42^{Bb}	11.95±0.87^{Cd}	8.56±0.71^{Bc}	<0.001

2.5 饲粮铜水平对奶牛铜代谢的影响

由表 6 可知，每天粪铜含量（即粪中铜的排出量）随着饲粮铜水平的增加而增加，与I组相比，II、III和IV组每天粪铜含量显著提高了 125.15%、187.79%和 250.83%（*P*<0.01），各组间差异极显著（*P*<0.01）。各试验组每千克粪铜含量和每天粪铜总量变化规律一致。与I组相比，II、III和IV组尿铜（即尿中铜的排出量）含量分别提高了 6.32%（*P*>0.05）、40.27%（*P*<0.05）和 65.61%（*P*<0.01）。饲粮铜水平对乳铜含量无显著影响（*P*>0.05）。各组的铜表观消化率差异不显著（*P*>0.05）。每日铜沉积量随着饲粮铜水平的增加而增加，II、III和IV组极显著高于I组（*P*<0.01），III组显著高于II组（*P*<0.05），IV组极显著高于II组（*P*<0.01）并显著高于III组（*P*<0.05）。II、III和IV组的铜沉积率差异不显著（*P*>0.05），但分别比I组提高了 80.37%、78.76%和 79.91%（*P*<0.01）。

表 6　饲粮铜水平对奶牛铜代谢的影响

Table 6　Effects of dietary copper levels on copper metabolism of lactating dairy cows

项目 Items	组别 Groups I	II	III	IV	*P* 值 *P*-value
铜采食量 Copper intake/(mg/d)	179.84	403.59	514.21	624.44	
粪铜 Fecal copper/(mg/d)	139.28±2.82^{A}	313.59±6.87^{B}	400.84±4.77^{C}	488.63±9.43^{D}	<0.001
粪铜 Fecal copper/(mg/kg)	31.62±0.38^{A}	73.40±1.86^{B}	93.51±3.96^{C}	105.03±4.44^{D}	<0.001
尿铜 Urinary copper/(mg/d)	18.03±1.55^{Aa}	19.17±3.09^{Aa}	25.29±3.85^{ABb}	29.86±0.98^{Bb}	0.002
乳铜 Milk copper/(mg/d)	6.74±0.62	7.12±0.46	7.66±1.54	7.65±1.60	0.737
铜沉积量 Copper deposition/(mg/d)	15.79±3.99^{Aa}	63.71±7.67^{Bb}	80.42±9.09^{BCc}	98.31±8.21^{Cd}	<0.001
铜表观消化率 Copper apparent digestibility/%	22.55±1.57	22.30±1.70	22.05±0.93	21.75±1.51	0.915
铜沉积率 Copper deposition rate/%	8.78±2.22^{Aa}	15.78±1.90^{Bb}	15.64±1.77^{Bb}	15.74±1.32^{Bb}	0.003

3 讨　论

3.1 饲粮铜水平对奶牛干物质采食量和生产性能的影响

干物质采食量受饲料适口性、瘤胃充盈度、食糜外流速度和奶牛自身的新陈代谢等因素的影响[22-23]。Ward 等[24]研究表明，补铜可提高牛的干物质采食量，而本研究中不同铜采食量对奶牛干物质采食量无显著影响，这种差异可能和试验牛品种、饲粮组成及试验牛对铜的缺乏程度有关。

产奶量是衡量经济效益的重要指标之一，在饲粮中添加 7.6 mg/kg 铜，产奶量提高了 4.85%~9.61%，但乳脂率没有显著变化[25-26]。对分娩 100~120 d 的荷斯坦奶牛补铜，饲养 120 d 后，补铜组的产奶量比对照组高 3.3%，每千克 4%标准乳（4% FCM）消耗的产奶净能（NE_L）比对照组低 8.6%[27]。本试验结果显示，随着饲粮铜水平的增加，产奶量、乳脂率、乳蛋白率和 FCR 均有所提高，但当饲粮铜水平为 28.09 mg/kg DM（铜采食量为 624.44 mg/d）时，其产奶量较饲粮铜水平为 23.09 mg/kg DM（铜采食量为 514.21 mg/d）时反而有所下降，这与刘曦[6]研究结果一致，这可能是因为奶牛对铜的需要量受其自身条件和外部条件的影响[28]，采食过多的铜会对奶牛机体造成负影响，影响奶牛的生产性能。

3.2　饲粮铜水平对奶牛养分表观消化率的影响

许多研究表明，饲粮中铜水平的增加可显著提高 NDF 和 ADF 的表观消化率[29-31]，本试验也证实了这一论点，当饲粮铜水平为 18.09 mg/kg DM（铜采食量为 403.59 mg/d）和 23.09 mg/kg DM （铜采食量为 514.21 mg/d）时可显著提高 NDF 和 ADF 的表观消化率，这可能是因为奶牛采食适量的铜能够抑制有害菌的繁殖，促进有益菌的生长所致[31]；还可能是因为铜能够促使肠黏膜细胞更替减缓，从而降低消化道对能量的需要，进而降低机体对能量的维持需要[32]。另据研究报道，当奶牛饲粮中添加 24 mg/kg 铜时，CP 的表观消化率最高[6]，而本研究中，当饲粮铜水平为 28.09 mg/kg DM（铜采食量为 624.44 mg/d）时，CP 表观消化并没有达到最高，这种差异可能是因为试验饲粮组成不同所致[33]。

3.3　饲粮铜水平对奶牛血清抗氧化指标的影响

血清铜含量可反映铜在机体内代谢的状态[34-35]，奶牛的血清铜含量一般为 7.87~18.89 μ mol/L[36]。Suttle[37]研究表明，当牛羊血浆铜含量不足 9 μmol/L 时，就可断定其处于铜缺乏状态。本试验发现，血清铜含量随着饲粮铜水平的增加而升高，这与张圆[38]研究结果一致。虽然各组的血清铜含量均处于正常范围，但I组（饲粮铜水平为 8.09 mg/kg DM，铜采食量为 179.84 mg/d）的血清铜含量在正常范围内属于较低水平。铜蓝蛋白是一种含铜的糖蛋白，具有调节铜在机体各个部位的分布、合成含铜的酶蛋白与作为机体抗氧化剂的作用，铜蓝蛋白还具有氧化酶活性，对多酚及多胺类底物有催化其氧化的能力[39-40]。本试验结果与程延彬[9]的研究结果均证实，血清铜蓝蛋白的含量随着饲粮铜水平的增加而升高。

铜是构成奶牛体内 SOD 与铜蓝蛋白等多种酶的重要组成成分与激活剂，缺铜会对机体

血红蛋白的形成、骨骼的构成与被毛色素的沉着等产生不良影响[41]。机体在正常生命活动过程中会产生超氧阴离子(O_2^-)、羟基自由基(-OH)和过氧化氢（H_2O_2）等活性氧，这些活性氧会对机体造成损害[42]。SOD 在清除活性氧的过程中最先发挥作用，能将 O_2^-歧化为 H_2O_2和氧气（O_2），是机体唯一可以特异性清除 O_2^-的抗氧化酶，是机体抗氧化系统的重要防线[43-44]。铜缺乏会降低 SOD 的活性和含量，会影响机体的抗氧化功能，这可能是因为铜含量会影响 *SOD* mRNA 的转录率；也可能是因为铜含量会对依赖铜的转录因子（ACE1）产生调控[45]。铜缺乏会降低 GSH-Px 的活性[46]，这是因为奶牛缺铜后会导致机体内 Cu-Zn SOD 活性下降，使 O_2^-浓度升高，蓄积的 O_2^-会降低 GSH-Px 的活性[47]，对机体造成严重的毒害。T-AOC 的高低能反映机体抗氧化的总体能力，抗氧化能力与机体的健康程度有着十分密切的联系。因为机体内具有抗氧化能力的物质很多，主要包括酚类物质和一些参与酶促反应的酶，例如 GSH-Px 和 SOD 等酶系，所以测定单个物质不能完全体现机体的抗氧化水平[48]。MDA 是膜脂质过氧化最重要的产物之一，可反映细胞组织过氧化的程度，也可反映自由基对组织细胞的攻击程度[49]，是机体自由基的指示物[50]，本试验证实，提高饲粮铜水平可以增加血清 SOD、Cu-Zn SOD、GSH-Px 活性和 T-AOC，降低 MDA 的含量，这与王聪等[51]、Lauridsen 等[52]、武福平等[2]研究结果一致。雷金龙等[53]报道，血清 MDA 的含量一般为 1.20~2.23 mmol/L，本试验中，I组（饲粮铜水平为 8.09 mg/kg DM，铜采食量为 179.84 mg/d）血清 MDA 含量为 3.42 mmol/L，高于血清 MDA 含量的正常范围。而提高饲粮铜水平能够显著降低血清 MDA 含量，II、III和IV组血清 MDA 含量均较 I 组有不同程度的降低，但仍均在正常范围。于先宁等[54]研究表明，当饲粮中铜水平达到 31.5 mg/kg 后再添加铜，血清铜、铜蓝蛋白含量和 Cu-Zn SOD 活性增加趋势不再显著。在本试验中，IV组（饲粮铜水平为 28.09 mg/kg DM、铜采食量为 624.44 mg/d）的血清铜、铜蓝蛋白含量和 Cu-Zn SOD 活性最高，对于进一步提高铜采食量对奶牛血清抗氧化指标的影响尚需进一步研究。总之，增加饲粮铜水平可以提高奶牛机体的抗氧化能力，从而更好地清除机体内自由基和脂质过氧化物，增强机体的抗氧化能力，但并非饲粮铜水平越高抗氧化能力就越强。

3.4 饲粮铜水平对奶牛血清生化指标的影响

血清中 TP、Glu 和 TG 的含量可作为蛋白质、糖和脂肪代谢的指标[55-57]，在一定程度上反映机体营养代谢的状况。血清 Glu 含量的范围一般为 2.3~4.1 mmol/L[58]。本试验中，随着

饲粮铜水平的增加血清 TP 含量明显升高，II、III和IV组血清 Glu 含量较I组显著增加且均处于正常范围内，血清 TG 含量呈相同变化趋势，这与王聪等[51]的报道一致，说明增加饲粮铜水平可促进蛋白质、糖和脂肪的代谢。T_3 和 T_4 在机体代谢活动中起到提高基础代谢率的调节作用，T_3 和 T_4 能增强糖原、蛋白质和脂肪的分解，有利于机体能量的供给[59-60]。铜缺乏会导致奶牛甲状腺内 Cu-Zn SOD 活性降低，这会引起脂质过氧化物的增多，从而抑制 T_3 和 T_4 的合成，影响甲状腺的功能，铜缺乏还会影响甲状腺组织细胞内色素氧化酶的活性，使细胞内的 ATP 合成不足，当细胞通过其他的代射途径获得 ATP 时会导致细胞内 pH 降低，这会抑制脱碘酶的活性，使 T_3 的合成受阻[61]。通常情况下，甲状腺主要分泌 T_4，其中有 40%的 T_4 经过脱碘转变为 T_3。因为 T_3 的生物活性远大于 T_4，所以普遍认为 T_4 是通过转化为 T_3 来发挥生理作用的[62]。本试验中，随着饲粮铜水平的增加，血清 T_3 和 T_4 的含量增加，这与乔栋等[63]、Lukaski 等[64]研究结果一致，说明增加饲粮铜水平对甲状腺功能有促进作用，这对于 Glu 的吸收利用、脂肪的分解、维持泌乳和影响动物体温方面都有着重要作用[65]。

IgG 在机体免疫中起到重要的免疫作用，动物缺铜会导致血清 IgG 含量降低[66-67]，这可能是因为缺铜会导致抗体的数量减少或免疫球蛋白分泌水平降低。Lukasewycz 等[68]研究表明，缺铜会降低刺激原脂多糖（LPS）的反应性，从而导致血清 IgG 含量降低。铜缺乏可致奶牛淋巴细胞内细胞色素氧化酶活性降低，使细胞内 ATP 生成减少，从而造成 IgG 合成受阻[69]。在雏鸡上的试验发现，高铜组血清 IgG 含量随饲粮中铜水平的增加而降低[70]。然而，儿童体内铜含量不足或过量均会血清 IgG 含量的下降[71]。本试验中，III组（饲粮铜水平为 23.09 mg/kg DM，铜采食量为 514.21 mg/d）血清 IgG 含量最高，而IV组（饲粮铜水平为 28.09 mg/kg DM，铜采食量为 624.44 mg/d）血清 IgG 含量却有所降低，这可能是因为高铜会对免疫器官造成负面影响，从而阻碍 B 淋巴细胞的增殖、分化和成熟，导致血清 IgG 含量的降低[72-75]。

3.5 饲粮铜水平对奶牛铜代谢的影响

机体内的铜主要依靠消化道排出，胆汁排出铜被认为是机体保持体内铜代谢平衡的主要途径之一，在调节铜平衡上，排泄要比肠道吸收更为重要[76]。饲粮中硫和钼的存在会降低铜的吸收率，饲粮中的硫会在瘤胃中转化为硫化物，生成硫化铜沉淀，从而阻碍铜的吸收和利用[77]。硫和钼会在瘤胃的固相食糜中形成四硫代钼酸盐，它会与铜结合生成高度不溶的

复合物，从而降低铜的吸收率[78]。硫和钼对铜的影响还与饲料原料相关，Underwood 等[8]认为，青贮饲料中可利用铜受钼水平影响较小，但若在饲粮中添加硫后，铜的利用率会明显下降；钼对干草饲料中铜的吸收存在抑制作用，但相对影响较小；硫和钼对于新鲜饲草中铜吸收率的影响远大于对干草和青贮饲料的影响，鲜草饲粮中添加硫和钼会显著降低铜的吸收率。在饲粮钼水平较低时添加钼对铜的吸收抑制作用较大，当饲粮钼水平达到 4~5 mg/kg DM 时，钼对铜吸收的抑制作用趋于稳定，这时再提高饲粮中钼的水平对铜的吸收无显著影响[79]。饲粮中添加的高剂量微量元素大部分都会随粪便排出体外，如果用这种动物粪便作为有机肥并且长期使用，会导致微量元素在土壤中富集，造成农作物的减产[80]。若这种粪便随废水排放而污染水源，则会显著降低水体的自净能力，使水质发生恶化，当水体中铜含量达到 0.5 mg/kg 时，可使大量的水生植物死亡[81]。通过降低微量元素的添加水平可有效减少粪便中微量元素的排泄量[82-83]。本试验中，随着饲粮铜水平的增加，粪铜、尿铜、乳铜含量和铜沉积量显著增加，但铜表观消化率却没有显著变化；增加饲粮铜水平后，虽然铜沉积率显著高于I组（饲粮铜水平为 8.09 mg/kg DM，铜采食量为 179.84 mg/d），但II、III和IV组之间没有显著差异，此试验结果与李宏等[84]研究结果一致。根据农业部 2625 号公告[85]和 NRC（2001）[11]，本试验中饲粮铜水平低于我国规定的最高限量 30 mg/kg DM，不会对奶牛造成中毒等危害。II和III组每千克粪铜含量低于我国在 2008 年颁布的《土壤环境质量标准》[86]，不会对土壤造成污染。本试验结果说明，饲粮铜水平的增加不影响奶牛对铜的消化和铜在奶牛体内的沉积。这可能是因为本试验所用饲粮中硫含量为 0.29%，属于低硫饲粮，与饲粮中铜的拮抗作用较小；又因为本试验中粗饲料以全株玉米青贮为主，饲粮中钼水平为 1.96 mg/kg DM，属于低钼饲粮，所以饲粮中不同水平的铜对其消化率和沉积率的影响较小。

4 结 论

在本试验条件下，饲粮中补充铜可以有效地提高奶牛的生产性能、饲粮 NDF 的表观消化率和机体的抗氧化能力和免疫力，但粪铜和尿铜含量随饲粮铜水平的增加而增加。综合考虑，奶牛饲粮适宜铜水平为 18.09～23.09 mg/kg DM（铜的采食量为 403.59～514.21 mg/d）。

参考文献：

[1] 许楚楚,刘健男,夏成,等.泌乳奶牛铜缺乏与机体氧化应激的关系[J].中国兽医杂志,2015,51(7):27–29.

[2] 武福平,夏成,张洪友,等.补铜对铜缺乏奶牛血浆 7 项生化指标的影响[J].黑龙江农业科学,2010(2):80–81.

[3] HART E B,STEENBOCK H,WADDELL J,et al.Iron in nutrition.Ⅶ.Copper as a supplement to iron for hemoglobin building in the rat[J].Nutrition Reviews,2002,45(8):181–183.

[4] 蔡永华,夏成,张洪友.补铜对奶牛血浆铜含量和铜蓝蛋白活性及其相关性的影响[J].中国畜牧兽医,2007,34(4):43–44.

[5] 于宁先,卢宝丽,张桂国,等.日粮中添加不同水平铜、铁、锌添加剂对奶牛产奶性能的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2011(9):60–63.

[6] 刘曦.不同铜源及水平对奶牛生产性能及营养物质消化率的影响[D].硕士学位论文.太谷:山西农业大学,2005.

[7] KEGLEY E B,SPEARS J W.Bioavailability of feed-grade copper sources (oxide,sulfate,or lysine) in growing cattle[J].Journal of Animal Science,1994,72(10):2728–2734.

[8] 程延彬.不同种类铜源及水平对奶牛瘤胃发酵及血液生化指标的影响[D].硕士学位论文.大庆:黑龙江八一农垦大学,2010.

[9] CUMMING I.The mineral nutrition of livestock[J].The Veterinary Journal,2001,161(1):70–71.

[10] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].6th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,1988.

[11] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[12] BILL W.美国微量元素专家Bill Weiss-奶牛矿物营养研究的最新进展[EB/OL].奶牛咨询网,[2017-05-11].http://www.nainiu365.com/news.asp?typeid=48&id=3274.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 6433–2006 饲料中粗脂肪的测定[S].北京:中国标准出版社,2006.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 6436–2002 饲料中钙的测定[S].北京:中国标准出版社,2002.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 6437–2002 饲料中总磷的测定 分

光光度法[S].北京:中国标准出版社,2002.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 20806－2006 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定[S].北京:中国标准出版社,2006.

[17] 中华人民共和国农业部.NY/T 1459－2007 饲料中酸性洗涤纤维的测定[S].北京:中国农业出版社,2007.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 6432－1994 饲料中粗蛋白测定方法[S].北京:中国标准出版社,1994.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 17776－2016 饲料中硫的测定 硝酸镁法[S].北京:中国标准出版社,2016.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 17777－2009 饲料中钼的测定 分光光度法[S].北京:中国标准出版社,2009.

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 13885–2003 动物饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定原子吸收光谱法[S].北京:中国标准出版社,2003.

[22] BELYEA R L,MARIN P J,SEDGWICK H T.Utilization of chopped and long alfalfa by dairy heifers[J].Journal of Dairy Science,1985,68(5):1297–1301.

[23] ALLEN M S.Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle[J].Journal of Dairy Science,2000,83(7):1598–1624.

[24] WARD J D,SPEARS J W,郭艳丽.加钼或未加钼的低铜日粮对牛的铜状态、生产性能和胴体品质的长期影响[J].草原与草坪,1999(3):33–40.

[25] 王德发.谈影响鲜奶乳脂率的几个环节[J].中国奶牛,1993(3):13.

[26] 黄志秋,何学谦,刘利春,等.日粮中添加铜对高产乳牛泌乳量影响的研究[J].四川畜牧兽医,2001,28(11):22–24.

[27] 刘明祥,弓子敬,黄应祥,等.微量元素铜、锌、硒、碘单因子饲喂荷斯坦泌乳牛的试验[J].中国奶牛,1998(6):30–32.

[28] 智宏.奶牛对铜的需要量及其影响因素[J].养殖技术顾问,2011(2):50.

[29] 王聪,刘强,董宽虎,等.包被铜对西门塔尔牛日粮养分消化代谢和血液指标的影响[J].核农学报,2008,22(6):887–891,828.

[30] 张艳,薛世明,刘强.不同水平蛋氨酸铜对肉牛营养物质消化率的影响[J].畜牧与饲料科学,2009,30(1):81–83.

[31] 刘强,王聪,董宽虎,等.富铜酵母对西门塔尔牛日粮养分消化率和血液指标的影响[J].激光生物学报,2008,17(4):502–508.

[32] RADECKI S V,KU P K,BENNINK M R,et al.Effect of dietary copper on intestinal mucosa enzyme activity,morphology,and turnover rates in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1992,70(5):1424–1431.

[33] DURAND M,KAWASHIMA R.Influence of minerals in rumen microbial digestion[M]//RUCKEBUSCH Y,THIVEND P.Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants.Dordrecht:Springer,1980:375–408.

[34] 李淑青,曹顶国,杨在宾,等.饲料中不同钼铜水平对肉牛血铜代谢规律的研究[J].中国草食动物科学,2006,26(1):9–12.

[35] 孔祥瑞,李立群.血清铜的正常值、昼夜变化及临床诊断意义(摘要)[C]//中国营养学会首届微量元素专题讨论会论文摘要汇编.青岛:中国营养学会,1985:55.

[36] 王英民.家畜微量元素代谢障碍的预防[M].北京:农业出版社,1988:113–114.

[37] SUTTLE N F.Problems in the diagnosis and anticipation of trace element deficiencies in grazing livestock[J].Veterinary Record,1986,119(7):148–152.

[38] 张圆.铜和锌对奶牛血清和牛乳中相关指标的影响[J].养殖与饲料,2013(12):30–33.

[39] 刘强,董宽虎,王聪,等.日粮添加富铜酵母对奶牛泌乳性能和乳品质的影响[J].当代畜牧,2008(7):36–38.

[40] HUSSEIN H A,STAUFENBIEL R.Variations in copper concentration and ceruloplasmin activity of dairy cows in relation to lactation stages with regard to ceruloplasmin to copper ratios[J].Biological Trace Element Research,2012,146(1):47–52.

[41] 李前勇.猪铜蓝蛋白的纯化、性质、功能及其基因克隆与表达研究[D].博士学位论文.重庆:西南大学,2010.

[42] 李建喜,杨志强,王学智.活性氧自由基在动物机体内的生物学作用[J].动物医学进展,2006,27(10):33–36.

[43] FRIDOVICH I.Superoxide radical and superoxide dismutases[J].Annual Review of Biochemistry,1995,64(1):97–112.

[44] GRECO M A,HRAB D I,MAGNER W,et al.Cu,Zn superoxide dismutase and copper deprivation and toxicity in *Saccharomyces cerevisiae*[J].Journal of Bacteriology,1990,172(1):317–325.

[45] 唐凌,邝声耀.铜对动物超氧化物歧化酶活性的影响及可能的作用途径[J].中国畜牧杂志,2013,49(21):79–83.

[46] 柴春彦,刘国艳,石发庆.铜缺乏对乳牛血液抗氧化功能的影响[J].动物科学与动物医学,2002,19(4):26–29.

[47] GROSSMANN A,WENDEL A.Non-reactivity of the selenoenzyme glutathione peroxidase with enzymatically hydroperoxidized phospholipids[J].European Journal of Biochemistry,1983,135(3):549–552.

[48] 代迎春.围产期奶牛血清中抗氧化酶活性与铜锌锰镁含量变化规律的比较研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.

[49] 范石军,韩友文,李德发,等.雏鸡高温应激与超氧化处理对其肝脏丙二醛和谷胱甘肽过氧化物酶含量及活性的影响[J].中国饲料,2001(10):11–13.

[50] PAYNTER D I.The role of dietary copper,manganese,selenium,and vitamin E in lipid peroxidation in tissues of the rat[J].Biological Trace Element Research,1980,2(2):121–135.

[51] 王聪,董宽虎,刘强,等.蛋氨酸铜对西门塔尔牛日粮养分消化代谢及血液指标的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1523–1527.

[52] LAURIDSEN C,HØJSGAARD S,SORENSEN M T.Influence of dietary rapeseed oil,vitaminE,and copper on the performance and the antioxidative and oxidative status of pigs[J].Journal of Animal Science,1999,77(4):906–916.

[53] 雷金龙,吴树清,王玲玲,等.围产期奶牛血清中 GSH-Px、SOD、MDA 的比较研究[J].中国奶牛,2008(6):38–43.

[54] 于宁先,张桂国,杨在宾.日粮中添加不同水平铜、铁、锌对奶牛血液生化指标影响的研究[J].饲料博览,2010(3):35–39.

[55] 董德宽.关于牛羊血清蛋白组分含量的研究[J].草食家畜,1983(4):1–4.

[56] 刘乐,于会宁,郭晓坤,等.OGTT0.5h 血糖切点值在诊断糖尿病及糖尿病前期中的临床意义[J].国际内分泌代谢杂志,2015,35(4):217–221.

[57] ENGLE T E,SPEARS J W,ARMSTRONG T A,et al.Effects of dietary copper source and concentration on carcass characteristics and lipid and cholesterol metabolism in growing and finishing steers[J].Journal of Animal Science,2000,78(4):1053–1059.

[58] 弗雷萨.默克兽医手册[M].韩谦,译.北京:北京农业大学出版社,1997.

[59] 李江涛.甘氨酸铜对断奶仔猪生产性能、相关血液生理生化指标的影响研究[D].硕士学位论文.保定:河北农业大学,2010.

[60] OOI G T,TAWADROS N,ESCALONA R M.Pituitary cell lines and their endocrine applications[J].Molecular and Cellular Endocrinology,2004,228(1/2):1–21.

[61] PROHASKA J R.Changes in tissue growth,concentrations of copper,iron,cytochrome oxidase and superoxide dismutase subsequent to dietary or genetic copper deficiency in mice[J].The Journal of Nutrition,1983,113(10):2048–2058.

[62] 张丽.日粮甜菜碱对热应激奶牛产奶性能、血液生理生化指标及 HSP70 的影响[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2012.

[63] 乔栋,姚继广,任有蛇,等.铜源和铜水平对晋岚绒山羊血清生殖激素和甲状腺素的影响[J].中国草食动物科学,2014,34(1):26–27,20.

[64] LUKASKI H C,HALL C B,MARCHELLO M J.Body temperature and thyroid hormone metabolism of copper-deficient rats[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,1995,6(8):445–451.

[65] 张士明.甲状腺素在葡萄糖内环境稳定上的致病影响[J].国际内分泌代谢杂志,1983(4):201–202,191.

[66] 高东微,马孝斌,孙远明.牛免疫球蛋白 G 的应用及检测研究进展[J].食品工业科技,2009(5):356–359.

[67] KOLLER L D,MULHERN S A,FRANKEL N C,et al.Immune dysfunction in rats fed a diet deficient in copper[J].The American Journal of Clinical Nutrition,1987,45(5):997–1006.

[68] LUKASEWYCZ O A,PROHASKA J R.Lymphocytes from copper-deficient mice exhibit decreased mitogen reactivity[J].Nutrition Research,1983,3(3):335–341.

[69] 柴春彦,刘国艳,石发庆.铜缺乏对奶牛免疫功能的影响[J].动物科学与动物医学,2002,19(8):25–29.

[70] 徐之勇,朱奎成,崔恒敏,等.日粮高铜对雏鸡血清免疫球蛋白含量的影响[J].中国兽医学报,2008,28(11):1352–1355.

[71] 刘铁纯,奚景贵,王慧远,等.微量元素锌、铜、铁与小儿免疫关系的探讨[J].中国免疫学杂志,1989,5(5):317.

[72] 崔恒敏,陈怀涛.铜中毒对雏鸭某些血液指标的影响[J].中国兽医学报,2005,25(3):311–313.

[73] 杨光,崔恒敏,邓俊良,等.实验性雏鸡铜中毒的病理学研究[J].中国兽医科学,2005,35(10):801–806.

[74] 彭西,朱奎成,徐之勇,等.高铜对雏鸡器官组织病理损害的研究[J].中国兽医科学,2006,36(8):659–664.

[75] 吴建设,呙于明,杨汉春,等.日粮铜水平对肉仔鸡生长性能和免疫功能影响的研究[J].畜牧兽医学报,1999,30(5):414–420.

[76] 杨顺江.动物微量元素营养学[M].武汉:湖北科技出版社,1989.

[77] 展振峰.不同钼、硫、氮、铜水平对瘤胃发酵及营养物质代谢规律影响的研究[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2005.

[78] ALLEN J D,GAWTHORNE J M.Involvement of the solid phase of rumen digesta in the interaction between copper,molybdenum and sulphur in sheep[J].British Journal of Nutrition,1987,58(2):265–276.

[79] WARD J D,SPEARS J W.The effects of low-copper diets with or without supplemental molybdenum on specific immune responses of stressed cattle[J].Journal of Animal Science,1999,77(1):230–237.

[80] 程学慧,彭健,刘涛.用营养调控缓解养猪生产对环境的污染[J].中国饲料,2001(16):27–28.

[81] 王延周,齐德生.高剂量微量元素对环境的危害及预防[J].中国饲料,2002(10):25–26.

[82] BURKETT J L,STALDER K J,POWERS W J,et al.Effect of inorganic and organic trace mineral supplementation on the performance,carcass characteristics,and fecal mineral excretion of phase-fed,grow-finish swine[J].Asian Australasian Journal of Animal Sciences,2009,22(9):1279–1287.

[83] BUFF C E,BOLLINGER D W,ELLERSIECK M R,et al.Comparison of growth performance and zinc absorption,retention,and excretion in weanling pigs fed diets supplemented with zinc-polysaccharide or zinc oxide[J].Journal of Animal Science,2005,83(10):2380–2386.

[84] 李宏,郑中朝,郭天芬,等.日粮铜水平对兔组织器官中铜沉积量及铜代谢的影响[J].中国草食动物科学,2000,2(4):11–13.

[85] 中华人民共和国农业部公告第 2625 号[S].北京:中华人民共和国农业部,2017.

[86] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 15618–2008 土壤环境质量标准(修订)[S].北京:中国标准出版社,2008.

Effects of Dietary Copper Levels on Performance, Nutrient Apparent Digestibility and Serum Biochemical Indices of Lactating Dairy Cows

FU Jiguang[1] GAO Yanxia[1] LI Yan[2] LI Qiufeng[1] CAO Yufeng[1] ZHANG Xiujiang[3] LI Jianguo[1*]

（1. *College of Animal Science and Technology, Hebei Agriculture University*, *Baoding* 071001, *China*; 2. *College of Veterinary Medicine, Hebei Agricultural University, Baoding* 071001, *China*; 3. *Baoding Municipal Bureau of Agriculture, Baoding* 071000, *China*）

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of dietary copper levels on the performance, nutrient apparent digestibility and serum biochemical indices of lactating dairy cows. A total of 60 China Holstein lactating dairy cows with similar milk yield, lactation days and parity were selected, and randomly divided into 4 groups with 15 in each group. The supplemental levels of copper in diets were 0 (control, group I), 10 (group II), 15 (group Ⅲ), and 20 mg/kg (group IV),

*Corresponding author， professor, E-mail:1181935094@qq.com （责任编辑 陈 鑫）

respectively, and the levels of dietary copper were 8.09, 18.09, 23.09 and 28.09 mg/kg DM, respectively. The whole trial lasted for 90 days. The results showed as follows: 1) compared with group I, the milk yield in groups II, III and IV was increased by 4.91%, 6.27% and 4.78% ($P<0.05$), respectively, and the somatic cell count in groups II, III and IV significantly decreased ($P<0.01$). 2) Compared with group I, the neutral detergent fiber (NDF) apparent digestibility in groups II and III was increased by 6.21% and 7.60% ($P<0.05$), and the acid detergent fiber (ADF) apparent was increased by 6.78% and 8.22% ($P<0.05$), respectively. 3) Compared with group I, the contents of serum copper and ceruloplasmin, and the activities of superoxide dismutase (SOD), copper-zinc superoxide dismutase (Cu-Zn SOD) and glutathion peroxidase (GSH-Px) in groups II, III and IV were significantly increased ($P<0.01$); the content of serum malonaldehyde (MDA) was decreased by 50.00%, 60.23% and 47.08% ($P<0.01$), respectively; the content of immunoglobulin G (IgG) was increased by 49.56%, 165.56% and 90.22% ($P<0.01$), respectively. 4) Analysis of the indicators of copper metabolism showed that supplemental copper could significantly increase the fecal copper and urine copper contents (excretion) and copper deposition ($P<0.01$), but the dietary copper level had no significant effect on the apparent digestibility of copper ($P>0.05$). In conclusion, diets supplemented with copper can improve the performance of lactating dairy cows, promote the utilization of nutrients and improve the body's immunity and antioxidant capacity, but increasing copper level leads to an increase of copper excretion. In this experiment, the suitable dietary copper level in the diet of lactating dairy cows is 18.09 to 23.09 mg/kg DM (copper intake is 403.59 to 514.21 mg/d).

Key words: lactating dairy cows; copper; performance; apparent digestibility; serum biochemical indices; copper metabolism